

УДК 681.3.06

**В. С. Цапар**, канд. техн. наук,**О. А. Жученко**, канд. техн. наук.

Національний технічний університет України «КПІ», м. Київ

## ДОСЛІДЖЕННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ

Робота присвячена дослідженню імітаційної моделі теплового режиму роботи скловарної печі. На базі математичної моделі отримано імітаційну модель скловарної печі. Наведені отримані результати імітаційного моделювання у вигляді температурного розподілу у декількох перерізах скловарної печі. Проведена перевірка на адекватність котра показала відповідність розробленої моделі реальному об'єкту.

**Ключові слова:** *скловарна піч, математична модель, Fluent, температурні поля.*

**Вступ.** Скло є матеріалом, який широко застосовується практично в усіх сферах людської діяльності — у промисловості та сільському господарстві, у будівництві та на транспорті, у побуті та медицині — завдяки своїм унікальним якостям: прозорості, твердості, хімічній стійкості до активних хімічних реагентів, відносної дешевизні виробництва. Без нього неможливо виготовити оптичні прилади, телевізори, космічні кораблі та інше. Попри успіхи у створенні нових матеріалів широкого призначення, скло залишається одним із найбільш поширених матеріалів, що застосовуються на практиці.

Скловарна піч є основним агрегатом заводу із виготовлення скляних виробів. У скловарній печі одержують скломасу шляхом плавлення суміші шихти та склобою. В залежності від того, яка саме скляна продукція виготовляється, скловарні печі можуть мати різноманітні конструкції, а шихта може відрізнятись хімічним складом. Також від найменування виробів залежить і тепловий режим роботи скловарної печі, який є визначальним для забезпечення необхідної якості виробів.

**Постановка задачі.** Щоб забезпечити безперервне функціонування скловарної печі у потрібному технологічному режимі, який забезпечував би високу якість готової продукції, необхідна ефективна система керування процесом скловаріння. Розробка такої системи керування пов'язана із значними труднощами, викликаними необхідністю проведення досліджень на працюючій печі, що, як правило, призведе до відхилення технологічного режиму від регламентного і, як результат, може призвести до отримання бракованої продукції та, як крайній випадок, до виникнення аварійних ситуацій, а значить, суттєвих втрат виробництва, що є неприпустимим.

Для того, щоб уникнути цього, єдиною альтернативою фактично є проведення дослідження скловарної печі та її системи керування, використовуючи метод математичного моделювання.

Отже, виникає актуальна науково-технічна задача створення і дослідження імітаційної моделі теплового режиму роботи скловарної печі.

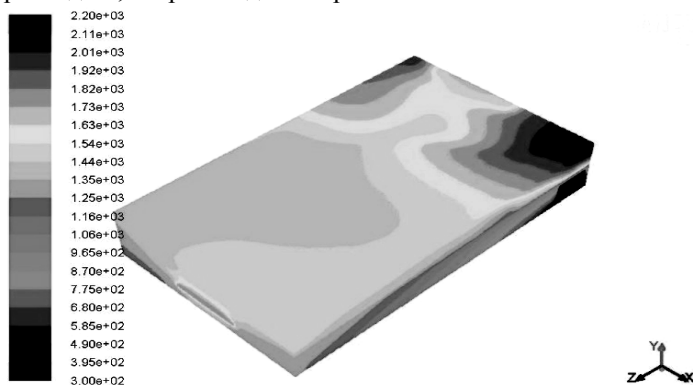
**Виклад основного матеріалу.** Скловарна піч — складний технологічний об'єкт. У печі одночасно відбуваються хімічні та фізичні перетворення, паралельно протікають всі три види теплообміну, при чому як у газовому середовищі, так і у рідкій скломасі. Процес скловаріння характеризується багатьма взаємно пов'язаними між собою параметрами, які впливають як один на одного, так і на кількість та якість готової продукції в цілому. У зв'язку з цим імітаційне моделювання скловарної печі з урахуванням усіх фізико-хімічних процесів, які в ній відбуваються — неймовірно складна науково-технічна задача. Як показав аналіз відомих математичних та імітаційних моделей [1, с. 136–172; 2, с. 450–459; 3, с. 129–137], дана задача ще не повністю розв'язана.

За основу імітаційної моделі взято математичну модель наведену у [4, с. 32–37]. Розробка імітаційної моделі теплового режиму роботи скловарної печі проводилась у програмному пакеті ANSYS FLUENT.

Першим етапом розробки імітаційної моделі теплового режиму роботи скловарної печі є розробка геометрії об'єкта що моделюється. За допомогою ANSYS FLUENT була розроблена спрощена геометрична модель скловарної печі.

Для чисельного розв'язку даної моделі необхідно розбити її на кінцеві об'єми. У даній роботі було використано розбиття за допомогою тетраедрів із стороною  $8 \cdot 10^{-2}$  м, зважаючи на геометричні розміри печі  $9 \cdot 15 \cdot 2,6$  м, дане розбиття є достатньо детальним, подальше зменшення призводить до значного зростання часу обчислень.

У результаті моделювання були отримані наступні температурні розподіли, котрі наведені на рис. 1–4.



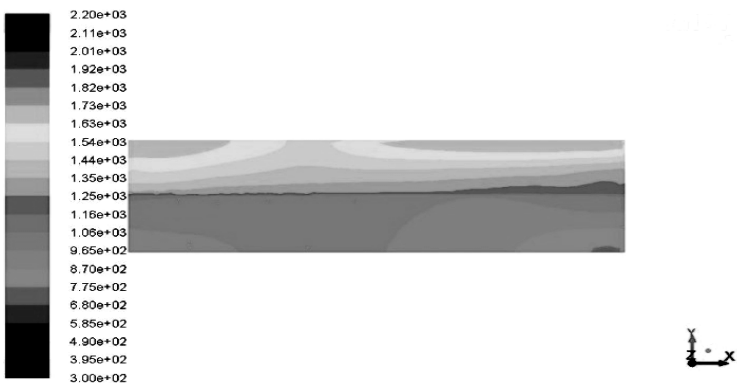
*Рис. 1. 3D модель температурного розподілу у скловарній печі*



*Рис. 2. Температурний розподіл у газовому просторі скловарної печі*



*Рис. 3. Температурний розподіл у скломасі*



*Рис. 4. Температурний розподіл поперечного перерізу скловарної печі на відстані 5м від початку печі*

**Дослідження адекватності імітаційної моделі.** Отримана модель дозволяє визначати динаміку зміни температури у будь якій точці даної печі. Для оцінки працездатності даної моделі було проведено дослідження її адекватності.

Для проведення подальших досліджень системи керування процесу скловаріння методом імітаційного моделювання використання математичної моделі цього процесу замість самого процесу можливе при умові адекватності моделі реальному об'єкту в усіх режимах роботи, що досліджуються. Для об'єктивного вирішення питання про адекватність чи неадекватність необхідно мати кількісну оцінку ступеня адекватності моделі реальному об'єкту, яка може бути різною у залежності як від конкретного завдання, так і від ступеня вивченості та формалізації об'єкта управління, що розглядається [5].

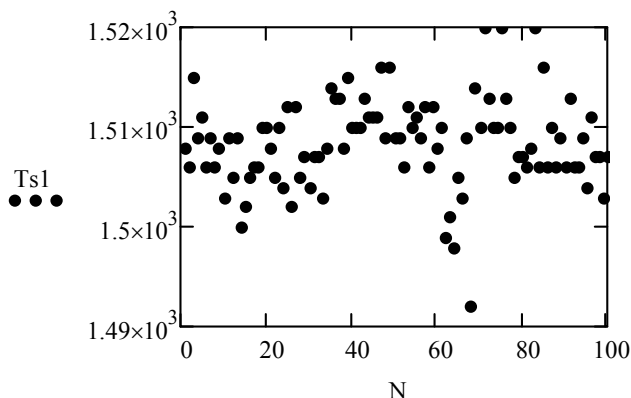
У даній роботі скористаємося двома статистичними критеріями для перевірки адекватності імітаційної моделі скловарної печі — критерієм Стюдента та критерієм Фішера.

Для перевірки на адекватність розробленої імітаційної моделі було проведено спостереження за двома вихідними змінними, що безпосередньо вимірюються на діючій печі Гостомельського скловарного заводу, протягом 100 годин:

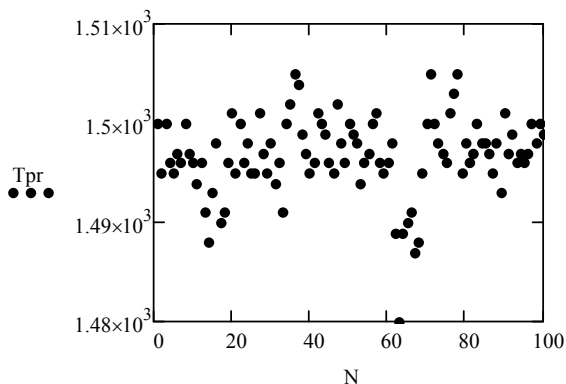
$T_{s1}$  — температура у точці «Склепіння 1».

$T_{pr}$  — температура у точці «Проток».

В результаті спостережень було отримано по 100 значень для кожної змінної, відповідні часові ряди зображені на рис. 5–6.



**Рис. 5.** Часовий ряд значень температури у точці «Склепіння 1» під час експерименту



**Рис. 6.** Часовий ряд значень температури у точці «Проток» під час експерименту

Визначаємо точкові оцінки математичних сподівань

Для температури у точці «Склепіння 1»:  $M_{Ts1} = 1508.43$ .

Для температури у точці «Проток»:  $M_{Tpr} = 1496.75$ .

Визначимо точкові оцінки дисперсій.

Для температури у точці «Склепіння 1»:  $S2_{Ts1} = 20.3$ .

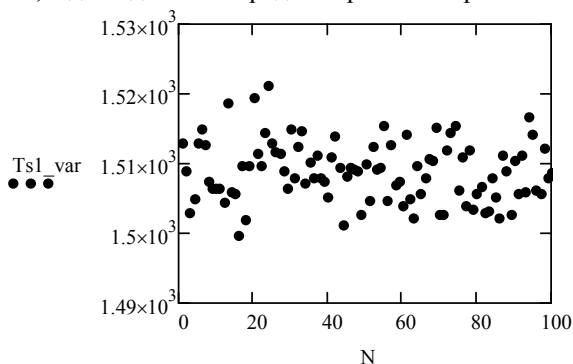
Для температури у точці «Проток»:  $S2_{Tpr} = 16.27$ .

Визначимо точкові оцінки середніх квадратичних відхилень.

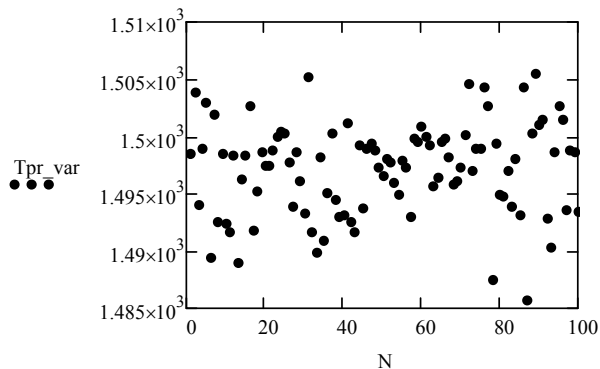
Для температури у точці «Склепіння 1»:  $S_{Ts1} = 4.5$ .

Для температури у точці «Проток»:  $S_{Tpr} = 4.03$ .

Та ж сама процедура була проведена і з математичною моделлю печі, в результаті чого було отримано по 100 відгуків моделі для кожної змінної, відповідні часові ряди зображені на рис. 7–8.



**Рис. 7.** Часовий ряд значень температури у точці «Склепіння 1» під час моделювання



**Рис. 8.** Часовий ряд значень температури у точці «Проток» під час моделювання

Визначаємо точкові оцінки математичних сподівань.

Для температури у точці «Склепіння 1»:

$$M\_Ts1\_mod = 1508.91.$$

Для температури у точці «Проток»:

$$M\_Tpr\_mod = 1497.21.$$

Визначимо точкові оцінки дисперсій

Для температури у точці «Склепіння 1»:

$$S2\_Ts1\_mod = 18.65.$$

Для температури у точці «Проток»:

$$S2\_Tpr = 16.19.$$

Визначимо точкові оцінки середніх квадратичних відхилень

Для температури у точці «Склепіння 1»:

$$S\_Ts1 = 4.5.$$

Для температури у точці «Проток»:

$$S\_Tpr = 4.02.$$

Для перевірки адекватності за першим способом для температури у точці «Склепіння 1», визначимо величину  $t$ .

$$t = \frac{|M\_Ts1 - M\_Ts1\_mod|}{\sqrt{\left(\frac{1}{N} + \frac{1}{N1}\right) \cdot \frac{(N-1) \cdot S2\_Ts1 + (N1-1) \cdot S\_Ts1\_mod}{N + N1 - 2}}} = 1.02$$

За таблицею двосторонньої критичної області критерію Стьюдента було визначено його критичне значення  $t_{kr} = 1.6849$ .

$$t < t_{kr}.$$

Для перевірки адекватності за першим способом для температури у точці «Проток», визначимо величину  $t$ .

$$t = \frac{|M\_Tpr - M\_Tpr\_mod|}{\sqrt{\left(\frac{1}{N} + \frac{1}{N1}\right) \cdot \frac{(N-1) \cdot S2\_Tpr + (N1-1) \cdot S\_Tpr\_mod}{N + N1 - 2}}} = 1.01.$$

За таблицею двосторонньої критичної області критерію Стьюдента було визначено його критичне значення  $t_{kr} = 1.6849$ .

$$t < t_{kr}.$$

Для перевірки адекватності за другим способом для температури у точці «Склепіння 1», визначимо величину вибіркового значення критерію Фішера.

$$F = \frac{S2\_Tsl}{S2\_Tsl\_g} = \frac{20.48}{20.3} = 1.008,$$

де  $S2\_Tsl\_g$  — дисперсія генеральних сукупностей відгуків моделі

Використовуючи інформацію про степені вільності  $k_{б\ddot{u}льш}$ ,  $k_{м\ddot{e}нш}$  і рівень значущості визначають критичне значення цього критерію  $F_{kr} = 1.69$ .

$$F < F_{kr}.$$

Для перевірки адекватності за другим способом для температури у точці «Проток», визначимо величину вибіркового значення критерію Фішера.

$$F = \frac{S2\_Tpr}{S2\_Tpr\_g} = \frac{16.41}{16.27} = 1.008,$$

де  $S2\_Tpr\_g$  — дисперсія генеральних сукупностей відгуків моделі

Використовуючи інформацію про степені вільності  $k_{б\ddot{u}льш}$ ,  $k_{м\ddot{e}нш}$  і рівень значущості визначають критичне значення цього критерію  $F_{kr} = 1.69$ .

$$F < F_{kr}.$$

Отримані результати дослідження наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

*Результати перевірки адекватності математичної моделі*

Критерії	Вихідні змінні (температури у точках):	
	$T_{sl}$	$T_{pr}$
Фішера	1,008	1,008
Стьюдента	1,02	1,01

Табличні значення критеріїв адекватності для обсягу вибірки  $n = 100$  та рівня значущості  $0,05$ :  $F_{kr} = 1,69$ ,  $t_{kr} = 1,6849$ .

Оскільки для усіх досліджуваних величин розрахункове значення критерію Стьюдента менше за критичне, то можна зробити висновок, що модель, яку ми отримали адекватна реальному об'єкту за гіпотезою про близькість математичних сподівань кожної  $k$ -ї компоненти моделі та реальної системи.

Оскільки для усіх досліджуваних величин розрахункове значення критерію Фішера менше за критичне, то можна зробити висновок, що модель, яку ми отримали адекватна реальному об'єкту за гіпотезою про однорідність двох дисперсій  $S_k^{2,s}$  і  $S_k^{2,g}$  для кожної  $k$ -ї компоненти.

**Висновок.** Досліджена у роботі імітаційна модель теплового режиму роботи скловарної печі дозволяє проводити дослідження систем керування без ризику значних економічних втрат. Дослідження на адекватність показало можливість застосування даної імітаційної моделі для розробки реальних систем керування із необхідною точністю. В подальшому планується розробка імітаційних моделей основних різновидів скловарних печей.

### Список використаних джерел:

1. Дзюзер В. Я. Математическая модель гидродинамики и внутреннего теплообмена // Проектирование энергоэффективных стекловаренных печей / В. Я. Дзюзер, В. С. Швыдкий ; общ. ред. В. Я. Дзюзер . — М. : Теплотехник, 2009 . — С. 136–172 .
2. Abbassi A. Numerical Simulation and Experimental Analysis of an Industrial Glass Melting Furnace / A. Abbassi, Kh. Khoshmanesh // Appl. Thermal Eng. — 2008. — Vol. 28 [5–6]. — P. 450–459.
3. Gershtein V. Yu. Mathematical model of complex heat transfer in the industrial furnace / V. Yu. Gershtein // Thermophysics and Aeromechanics. — 1995. — Vol. 2, № 2. — P. 129–137.
4. Жученко О. А. Математичне моделювання основних фізико-хімічних процесів при виробництві скла / А. І. Жученко, В.С. Цапар // Східно-Європейський журнал передових технологій. — 2014. — №1/3 (73). — С. 32–37.
5. Остапенко Ю. О. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів керування / Ю. О. Остапенко. — К. : Задруга, 1999. — 424 с.

This work is devoted to the simulation model of thermal conditions of the glass melting furnace. Based on the mathematical model simulation model glass furnace. These results of simulation modeling as the temperature distribution in several sections of the furnace. The adequacy of the audit which showed compliance of the model of real objects.

**Key words:** *glass furnace, mathematical model, Fluent, temperature fields.*

Отримано: 19.04.2016